

Würzb. Geogr. Arb.	69	9-43	Würzburg	1988
--------------------	----	------	----------	------

Karsterscheinungen in nichtkarbonatischen Gesteinen der Republik Niger

von

Detlef Busche, Würzburg
Barbara Sponholz, Würzburg

Zusammenfassung

Vorgestellt werden Lösungsformen in karbonatfreien Sandsteinen und Eisenkrusten der östlichen Republik Niger. Diese Formen haben eine außerordentlich weite Verbreitung und sind wesentliche Elemente der Landschaft. Beschrieben werden sowohl auf den Dachflächen der südsaharisch/sahelischen Schichtstufen entwickelte Depressionen mit subterranner Entwässerung als auch an Wadihängen und steilen Stufenabschnitten gekappte, horizontal bis schräg verlaufende Höhlen und Röhren. Viele dieser Lösungsformen sind zumindest in Resten noch von einer Eisen- oder Kieselkruste ausgekleidet, die u.a. als Indiz für eine Entstehung der Formen im Grundwasserbereich angesehen werden kann. Die Anlage der Karstformen wäre demnach noch vor die Herauspräparierung der Stufen und Inselberge im ausgehenden Tertiär zu stellen.

Die Karstformen in nichtkarbonatischen Gesteinen gleichen bis ins Detail denen des Karbonatkarstes. Eine initiale Formung durch äolische oder fluviatile Prozesse oder durch Piping kann ausgeschlossen werden.

Abstract

The authors describe subaerial and subterranean solution features in noncarbonatic sandstones and iron crusts from eastern Niger. They are of common occurrence and are an important element of the landscape. The paper discusses karst depressions of various sizes on all the plateau surfaces of the sahara-sahelian scarpland and mesa landscape, together with their subterranean network of tubes and caves. In some tubes relicts of an iron or silica coating are preserved, one evidence among other, morphological ones that the

passageways developed when completely filled with groundwater. The system originated during the Miocene and became dismembered during Pliocene scarpland and inselberg formation. The noncarbonatic karst forms closely resemble those of carbonate karst. Aeolian and fluvial processes, including piping, can be excluded as having created these landforms.

Résumé

L'étude expose des formes de dissolution dans des grès non calcaires et dans des croutes ferrugineuses dans l'Est de la République du Niger. Ces formes sont très répandues et elles sont des traits caractéristiques du paysage. Des dépressions fermées à drainage souterrain sur les hauts plateaux saharo-sahéliens sont également présentées que des conduits plutôt horizontaux qui sont coupés aux parois raides des falaises mêmes ou par des vallées entaillées. Beaucoup de ces formes de dissolution sont revetues au moins en restes d'une croute ferrugineuse ou silicieuse qui indique entre autres choses le développement des formes au niveau de la nappe d'eau souterraine. Ainsi la formation du réseau karstique doit avoir eu lieu avant le creusement des falaises au Tertiaire supérieur.

Les formes de dissolution dans les roches silicieuses correspondent parfaitement aux formes du karst calcaire. Au contraire, un modèle initial des formes par d'autres processus, par exemple par l'érosion éolienne, fluviale ou par piping peut être exclus.

Forschungsstand, Problemstellung

Die Untersuchung von Karsterscheinungen ist seit etwa Mitte des vorigen Jahrhunderts Gegenstand geomorphologischer Forschung. Die wesentlichsten Impulse zu dieser Thematik kamen aus der Arbeit in den Gebieten des "klassischen", dinarischen Karstes (CVIJC 1893). Mit der Erforschung der Karstphänomene zunächst in reinen Kalkgebieten und insbesondere mit dem Nachweis der CaCO_3 -Lösung als wesentlichstem Faktor für die Entstehung der Formen wurde zunehmend der Begriff "Karst" nur noch für Lösungsformen in Kalken, Gips und anderen bekanntermaßen leicht löslichen Gesteinen angewandt. Die Möglichkeit echter Lösung als formbestimmendem Prozeß auch in anderen, insbesondere silikatischen Materialien, wurde und wird hingegen von zahlreichen Autoren abgestrit-

ten. Den Formen des Karbonatkarstes entsprechende Erscheinungen, die im übrigen schon seit den ältesten Reiseberichten aus dem saharisch-sahelischen Raum und auch aus anderen Regionen immer wieder beschrieben werden, werden in den meisten Fällen als "Pseudokarst", vereinzelt auch als "Parakarst" bezeichnet und auf andere Prozesse (fluviale oder äolische Erosion, Piping etc.) zurückgeführt (ANELLI 1963, GAUDA et al. 1982, GAVRILOVIC 1969). Bis heute gibt es nur relativ wenige Arbeiten, die im Zusammenhang mit den genannten Formen die Lösung der silikatischen Komponenten, vor allem auch des Quarzes selbst, berücksichtigen (BUSCHE 1983, 1987, 1988, JÄKEL 1982, GEZE 1951, MAINGUET 1972, RENAULT 1953, WHITE, JEFFERSON & HAMANN 1966). Es existieren mittlerweile aber doch eine Reihe von Arbeiten, die sich unter anderen Fragestellungen mit der Löslichkeit und der Mobilität von Kieselsäure beschäftigt haben (u.a. SUMMERFIELD 1983, TIETZ 1987). Sie konnten teilweise erhebliche Mengen mobiler Kieselsäure sogar rezent nachweisen.

Die im folgenden vorgestellten Geländebefunde wurden überwiegend auf drei von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen eines größeren Forschungsprojektes geförderten Reisen 1986/87 gesammelt. Sie stammen alle aus der östlichen Republik Niger (Fig. 1), werden aber ergänzt durch eigene Beobachtungen aus anderen Regionen (südliches Algerien, Tschad) und Angaben aus der Literatur (RENAULT 1953, JÄKEL 1982). Unter Berücksichtigung der weiten Verbreitung von Silikatkarstformen kann ihnen eine erhebliche reliefprägende Bedeutung zugesprochen werden (vgl. a. MAINGUET 1972).

Dargestellt werden im folgenden vor allem die im Gelände erhobenen, morphologischen Befunde. Auf die bisher durchgeführte Laboranalytik soll nur randlich eingegangen werden.

Wie Fig. 1 zeigt, konnte im Untersuchungsraum in fast allen größeren Erhebungen Karst festgestellt werden. Fünf Gebiete daraus werden exemplarisch vorgestellt (Mangueni, Djado, Kaouar, Termit und Koutous), wobei sich durch die Lage dieser Gebiete zueinander ein Nord-Südprofil vom zentralsaharischen zum sahelischen Raum ergibt.

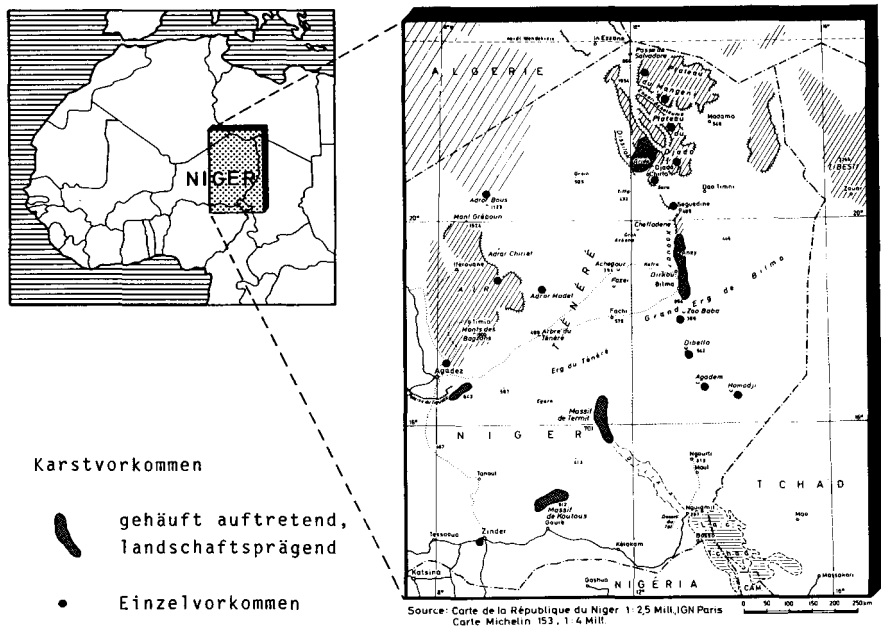


Fig. 1. Lage des Arbeitsgebietes und Verbreitung von Karstvorkommen in nichtkarbonatischen Gesteinen.

Geologisch-morphologischer Überblick

Soweit der hyperaride Nordosten der Republik Niger nicht Teil der flachwelligen Sandtenne des Erg du Ténéré ist, wird sein Relief von unterschiedlich stark aufgelösten Plateaus und Schichtstufen gebildet. Sie gehören zu der tektonischen Schwellenregion zwischen dem Murzukbecken in Südlibyen und dem Tschadbecken. Der im Grenzgebiet von Libyen und Niger liegende Teil wird als Plateau du Mangueni, das südlich anschließende Gebiet als Plateau du Djado bezeichnet (vgl. Fig. 1). Die Plateauhöhen liegen zwischen ca. 800 und 1.000 m ü.NN, die Vorlandfläche des Ténéré mit seinen in und um das Djado greifenden Ausläufern um 500 - 650 m ü.NN. Die relativen Stufenhöhen schwanken zwischen wenigen Zehnern von Metern im äußersten Südwesten des Djado-Plateaus bis zu über 200 m im Grenzgebiet zu Libyen.

Aufgebaut wird der Raum von schwach verstellten Schichten, die vom Kambrium bis wahrscheinlich in die Oberkreide, mit einer Schichtlücke im Jura, sedimentiert worden sind (PLAUCHUT et al. 1960, FAURE 1966, KLITZSCH 1970). Wichtig im Zusammenhang mit der Silikatkarstformung in diesem Raum sind einmal die kambrischen Sandsteine, die den Westrand des Djado-Plateaus bilden, sowie der kretazische Sandstein, der nach den französischen Geologen als Teil der Grès de Nubie, nach KLITZSCH (1970) als Messaksandstein bezeichnet werden kann. Dieser Sandstein liegt als eine nach SW ausdünnende Decke diskordant auf den paläozoischen Schichten. Nach Süden bilden mächtiger werdende, wahrscheinlich gleichaltrige Sedimente die Richtung Tschadsee zunehmend stärker isolierten, kleinen Plateaureste der Kaouarstufe, von Zoo Baba, Agadem, Dibella u.a., und auch Teile der Plateaus von Termit und Koutous. Nach Nordnordwest setzt sich die Decke des Messaksandsteins in das namensgebende Gebiet am Westrand des Murzukbeckens fort.

Postkretazisch ist der ganze Raum erst einer ausgedehnten Rumpfflächenbildung unterzogen worden. Anschließend wurde er im jüngeren Tertiär in die heutige Stufenlandschaft zerschnitten (vgl. BUSCHE 1980, 1982). Der annähernd ursprüngliche Flächencharakter ist nur dort erhalten geblieben, wo die Auflage des Messak- bzw. Nubischen Sandsteins nicht abgeräumt worden ist. Diese Dachfläche, die eine echte, schichtenkappende Rumpffläche ist, zeichnet sich, abgesehen von weitgespannten Verbiegungen, durch eine extreme Ebenheit aus, in deutlichem Unterschied zu der flachwelligen Ténéréfläche, die zum Ende der Stufenbildung entstanden war.

Diese Ebenheit wird mit der mitteltertiären Ausbildung einer Silcretedecke, die in einer schlecht drainierten Küstenebene unter wahrscheinlich feuchttropischen Bedingungen entstanden ist und die maximal wenige Meter dick ist, in Verbindung gebracht (BUSCHE 1983). Das Äquivalent der Silcretedecke, von Geologen als Quarzit aufgenommen, ist die siderolithische Fazies des Continental Terminal (FAURE 1966), eine häufig oolithische bis pisolithische Eisenkruste, die unter lagunären Bedingungen vorwiegend südlich des Kaouar abgelagert worden ist (s.u.), aber z. B. auch am Südwestrand des Djado-Plateaus, oberhalb Orida, auf dem kambrischen Sandstein gefunden worden ist.

Die untersuchten Teile der Mangueni-Dachfläche bestehen nur aus einem einzigen Niveau, von wenigen kleinen Inselbergen überragt,

ebenso wie die nordwestliche Dachfläche des Djadoplateaus. In den übrigen Teilen und verstärkt in dem nach Nordwesten an das Mangueni anschließenden Messak-Plateau führte eine unterschiedliche Hebungsgeschichte dazu, daß sich wenige Meter bis etwa 20 m unter dem Silcrete-Niveau ein tieferes Flächenniveau ausbildete, bevor die endgültige Zerschneidung der Dachfläche einsetzte.

Beim Massif de Termit handelt es sich um einen etwa 110 km nord-süd-erstreckten, wenige km breiten Schichtstufenkomplex, der zum Teil sehr stark aufgelöst ist. In sich ist das Gebiet tektonisch stark gestört, insgesamt zeigen jedoch die Schichten ein leichtes Einfallen nach Osten. Aufgebaut wird das Termit aus meist sehr stark eisenschüssigen, aber weitgehend karbonatfreien Sandsteinen des Continental Intercalaire (Kreide) und des Continental Terminal (Älteres Tertiär)(FAURE 1966). Im Süden besteht der oberste Stufenbereich aus mehrere Meter mächtigen, sedimentären Eisenkrusten des Continental Terminal. Von Norden und Osten her unterliegt die Stufe starker Einsandung vom Erg du Ténéré her. Im Westen treten stellenweise ausgedehnte Stufenvorlanddepressionen mit limnischen Akkumulationen auf. Das Niveau der Hauptdachfläche sinkt von rund 700 m ü.NN im Norden des Massivs auf rund 500 m ü.NN im Süden ab. Das Vorland ist bei etwa 350 - 400 m ü.NN entwickelt.

Das Massif de Koutous hingegen ist ein sehr stark aufgelöstes Tafelbergland. Wie das Termit ist es aus eisenreichen kontinentalen Serien aufgebaut, die ebenfalls in das Continental Intercalaire gestellt werden (FAURE 1966). Im Süden der Region sind über dem im Sandstein entwickelten Hauptdachflächenniveau bei knapp 600 m ü.NN noch 20 bis 30 Meter mächtige Reste eines alten Verwitterungsprofils erhalten. Als ein zweites Hauptniveau werden sie von einer lateritischen Eisenkruste plateauartig abgeschlossen. Während die Lateritdecke frei von karstähnlichen Lösungsformen ist, entspricht der Karstformenschatz im unterlagernden Sandstein weitgehend dem des Massif de Termit. Auf allen Seiten ist das Koutous von festliegenden Altdünen umgeben, die das Niveau des Vorlandes bei etwa 450 m ü.NN bestimmen. Den Stufen vorgelagerte Depressionen, wie sie aus den anderen genannten Regionen bekannt sind, konnten nicht nachgewiesen werden.

Plateau du Mangueni, Plateau du Djado und Kaouar

Diese drei Regionen umfassen den gesamten Nordosten des Arbeitsgebietes. In der ganzen Region, soweit sie zum französischen Kolonialgebiet gehört hat, sind in den 1950er Jahren Senkrechtluftbilder im Maßstab 1:50.000 geflogen worden. Überall dort, wo nicht rezenter Sandtransport durch den Passat die Kontraste herabgesetzt hat, zeigen diese Bilder auf der Dachfläche eine Vielzahl fast weiß erscheinender kleiner Flecken (vgl. Abb. 1), deren Dichte mit der Entfernung vom Plateaurand in den meisten Fällen abnimmt.

Im Gelände zeigt sich, daß es sich um Becken mit steilen Rändern handelt, deren Durchmesser von wenigen Metern bis zu einigen Zehnern von Metern reicht, die in den meisten Fällen bis auf das Niveau der umgebenden Felsfläche verfüllt sind. Im Luftbild sind sie deshalb so leicht zu erkennen, weil ihre Oberfläche unter einer lockeren Streu vom Rand eingeschwemmter kleiner Gesteinsbruchstücke von einer einige Zentimeter dicken, hellen Schlufflage gebildet wird. Unter diesem Produkt rezenter Verwitterung, Zusammenschwemmung und Materialanwehung liegt bei den bis an ihren Rand verfüllten Depressionen ein intensiv roter Boden, der wahrscheinlich älter als 10.000 Jahre ist (BUSCHE et al. 1979).

Daß diese Becken mehrere Meter tief sein können, läßt sich meist nur dort erkennen, wo sie an den Plateaurändern angeschnitten und ausgewaschen sind. Eine Reihe von Depressionen wurden gefunden, die bei noch voll erhaltener Abgeschlossenheit dennoch nur eine geringe Sedimentfüllung, fast ausschließlich mit hellem Schluff, zeigen. Bei bodendeckender Verfüllung finden sich meist mehrere unter einem Quadratmeter große Sackungsbereiche im Schluff. Bei nur geringer Bedeckung des fast ebenen Depressionsbodens finden sich entsprechend große, helle Schluffflecken darin (Abb. 2). In beiden Fällen konvergieren kleine Spülrinnen an den genannten Stellen.

Konvergente Spülformen zeigen vielfach auch die vollständig verfüllten Becken, am leichtesten erkennbar in dem Muster der feinen Steinstreu, die von den Rändern eingeschwemmt worden ist. Trockenrißmuster in der Schluffdecke sind ubiquitär. Dort, wo die Depressionen zusätzlich zur Boden- und Schlufffüllung leicht ein-

gesandet sind, finden sich beim Freigraben vielfach über 10 cm breite, sandgefüllte Trockenrisse. Es ist eindeutig, daß diese Depressionen bei den sehr seltenen Niederschlägen (in Anlehnung an die nächstliegende Station Dirkou, wahrscheinlich unter 20 mm/a) gelegentlich mit Wasser gefüllt sind. Trotz der sehr hohen potentiellen Verdunstung findet sich in den Depressionen keine über die der Umgebung hinausgehende Salzkonzentration. Dies spricht, zusammen mit den Befunden zum Fließbrinnenmuster, dafür, daß das Niederschlagswasser schneller, als es verdunsten kann, in den Untergrund abgeführt wird.

Eine große Anzahl von oberflächlich abflußlosen Depressionen ist in den Luftbildern bei monoskopischer Betrachtung nur bedingt erkennbar, weil aufgrund ihrer Ausdehnung nur ein geringer Teil ihres Bodens mit dem hellen Schluff bedeckt ist. Diese Depressionen, die ebenso wie die kleinen überwiegend unregelmäßig runde Umrisse haben, können mehrere ha groß sein und mehrere hundert Meter bis über 1 km Durchmesser haben, bei Tiefen gegenüber der Plateauoberfläche von meist nur wenige Metern. Unterhalb eines kurzen, nahezu senkrechten Abfalls setzen zum Beckeninneren hin konvergierende Schwemmfächer ein, in deren gemeinsamem Versickerungsbereich wiederum die helle Schluffdecke zu finden ist.

Diese größeren abflußlosen Depressionen finden sich im Mangueni und in den Teilen des Djadoplateaus, in denen nur eine einfache Dachfläche ausgebildet ist, meist in größerer Entfernung vom Plateaurand. Dort, wo die Dachfläche in zwei Niveaus unterteilt ist, beherrschen sie das Relief der unteren Fläche, während auf der oberen Fläche, die allein die Silcretedecke trägt, die Kleinformen dominieren (vgl. Fig. 2).

Die kleinen Depressionen haben in der Regel nur unkonzentrierten Zufluß von der umgebenden Fläche, dies oft schon deshalb, weil die verfüllten Hohlformen so dicht beieinanderliegen, daß für ein Gewässernetz kein Platz ist. Im Bereich der größeren Depressionen sind leicht in die Fläche eingesenkte Wadibetten, die in den Becken enden, häufig ausgebildet. In einigen Fällen macht es der langgestreckt-gewundene Verlauf großer Depressionen wahrscheinlich, daß es sich bei ihnen um abflußlos gewordene Abschnitte größerer Plateauwadis handelt, wie sie den ganzen, stärker gebogenen Westrand des Murzukbeckens dominieren.

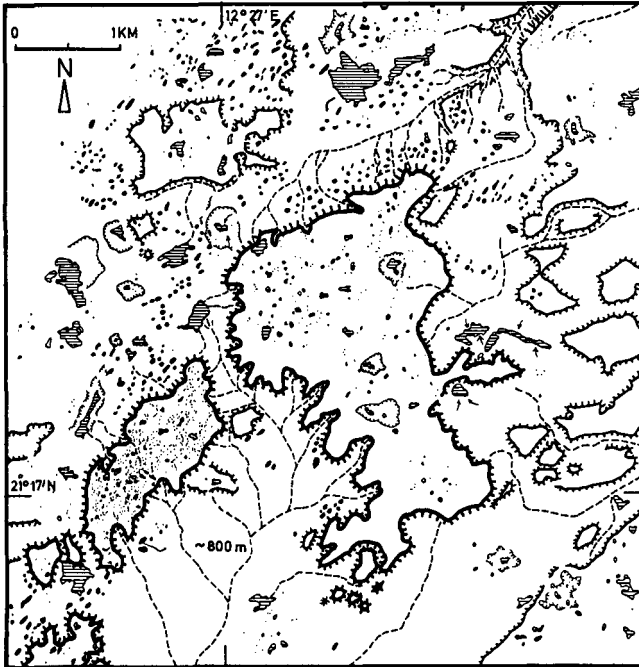





Fig. 2 Sandsteinkarstdepressionen auf der Dachfläche westl. Blaka Laodemi, Djado-Plateau

-  oberes Plateauniveau mit vorwiegend kleinen Depressionen
 ca. 20m tiefere untere Plateaufläche mit a) größeren flachen Karstwannen, b) Tonpfannen der Versickerungsbereiche c) Felstürmen, z.T. aerodynamisch korradiert, d) erniedrigten Resten des oberen Niveaus
 Abflußrichtung

Insgesamt zeichnen sich weite Teile des Mangueniplateaus sowie diejenigen Teile des Djadoplateaus, deren Dachfläche ebenfalls vom Messak- bzw. Nubischen Sandstein gebildet wird, durch weitflächiges Fehlen von Entwässerungslinien aus. Wo diese vorhanden sind, ist das System mit stark wechselnden Lauf- und Gefällsrichtungen zwischen den zahlreichen Endbecken so unübersichtlich, daß es selbst im Luftbild kaum vollständig zu kartieren ist. Die schlechte Ausbildung des Entwässerungsnetzes ist jedoch nicht die Folge der extremen Aridität, sondern die der offensichtlich dominanten unterirdischen Entwässerung, wie das gut ausgebildete

Wadinetz all jener benachbarten Regionen zeigt, deren Relief weder durch die Depressionen noch durch intensiven Windschliff gekennzeichnet ist.

Die extremste Auflösung der Dachfläche in abflußlose Hohlformen findet sich auf dem Sandsteinplateau des südlichen Kaouar. Zwischen den einzelnen, meist über 10 m tiefen Becken, die sehr unregelmäßige Umrisse haben und stark eingesandet sind, sind nur schmale Rücken erhalten geblieben, die vielfach an Klufltrichtungen angelegt sind. Die Beckenränder erscheinen vielfach getreppt, wie dies auch bei größeren Depressionen im Messak-Plateau beobachtet worden ist (BUSCHE & ERBE 1987).

Es ist nicht anzunehmen, daß die verschiedenen Arten von Depressionen auf einer nackten Fels- und Hammadafläche wie heute gebildet worden sind. Bei Plateaubegehungen stößt man immer wieder auf steil in den Untergrund führende einzelne Röhren oder Röhrensysteme außerhalb von Depressionen (s.u.). Weiterhin finden sich Reste offener Rinnensysteme, einige Dezimeter breit und tief, die sich, unabhängig von dem Kluftmuster der Silcretedecke, mäandrierend in diese quarzitharte Kruste eingeschnitten haben. Diese Rinnenrelikte haben keinerlei Ähnlichkeit mit den heutigen Abflußbahnen. Sie mäandrieren stark. Bei Aufgrabungen zeigen sich sehr steile bis überhängende, glatt poliert wirkende Wände mit ausgeprägten Kolken, die in steil in den Untergrund führende Röhren übergehen. Derartige Rinnen könnten mit schießendem Abfluß schleifmittelreichen Wassers erklärt werden. Die Rinnen befinden sich jedoch auf kaum reliefierten Flächen. Rekonstruierbare Einzugsgebiete zeigen nur eine sehr geringe Größe, so daß selbst heutige Starkregen solche Formen nicht schaffen könnten, abgesehen davon, daß die Spuren solcher aridklimatischer Starkregen anders aussehen.

In Zusammenschau mit den übrigen Befunden bleibt nur übrig, daß diese Rinnen, und mit ihnen zumindest die kleinen Depressionen, unter einer mächtigen, wasserspeichernden Bodendecke gebildet worden sind, daß als Bildungsprozess Lösung angenommen werden muß, und daß dies nicht unter einem ariden Klima stattgefunden haben kann. Das erhaltene Relief der Dachfläche zeigt, daß diese Lösungsvorgänge auf einer nahezu perfekten Ebene abgelaufen sein müssen.

Eine Konzentration von Röhrenaustritten, deren Durchmesser im Dezimeter- bis Meterbereich liegen, findet sich im Nubischen Sandstein des Djado-Plateaus in den obersten 20 bis 30 m unter der Trauf. Unklar ist, ob sich dadurch eine besonders starke unterirdische Verkarstung nahe der Oberfläche ausdrückt, oder ob sich hier nur die Aufschlußverhältnisse auswirken. Infolge der den Sandstein unterlagernden schluffig-tonigen Tilemsin-Schichten (Perm?) haben sich an den Stufenrändern etwa an der Wende Plio-Pleistozän sehr ausgedehnte Rutschungsstaffeln entwickelt (GRUNERT 1983, GRUNERT & BUSCHE 1980), so daß der ungestörte Sandstein nur an den Abrißwänden oberhalb der obersten Rutschungen aufgeschlossen ist. Vielfach ist aber auch der Sandstein selbst nur von geringer Mächtigkeit, so daß tieferliegende Röhren nicht zu erwarten sind.

An der Kaouarstufe, bei der es sich um eine homolithische, allein aus Sandsteinen ausgebildete Stufe handelt, finden sich nach den bisherigen, längst noch nicht flächendeckenden Befunden Röhrenaustritte und begehbare Höhlen in unterschiedlichen Höhen. Mehrfach konnte jedoch festgestellt werden, daß sich die Öffnungen auf bestimmte Niveaus konzentrieren.

Aus den zuletzt gemachten Ausführungen geht hervor, daß es sich bei den Formen des unterirdischen Sandsteinkarsts nicht um einige wenige, unbedeutende offene Passagen für das Grundwasser handelt, sondern daß die Anzahl solcher Öffnungen an Felswänden und Hängen in die Tausende gehen dürfte. Neben den deutlich sichtbaren Röhren gibt es an rutschungsfreien Hängen vielfach kleine, unauffällige Wasseraustritte, die in erster Linie durch die an ihnen einsetzende Verspülung von Hangschutt erkennbar sind. Die Größe des Arbeitsgebietes und die logistisch bedingte Kürze von Aufenthalten haben auf den Reisen immer nur punktuell arbeiten erlaubt. Bei fast jedem Stufenaufstieg und an jedem Inselberg sind jedoch Spuren unterirdischen Sandsteinkarsts gefunden worden. Auch darin zeigt sich die große Häufigkeit dieser Formen.

Am auffälligsten sind die Formen unterirdischen Karsts an schuttarmen Inselbergen, sei es an den bis über 300 m hohen Formen aus kambrischem Sandstein im Raum Djado - Orida, im Gebiet der windreliefierten kleinen Inselberge südlich der Wasserstelle Sara, beide am Südwestrand des Djado-Plateaus, oder an den wenigen kleinen Inselbergen vor der Kaouar-Stufe. Nördlich der

Oase Anay gibt es dort einen Felsen von kaum über 100 m Länge, knapp 20 m Breite und Höhe, der dreidimensional derart von mehreren begehbaren und Zehnern von nicht begehbaren Karstformen durchzogen ist, daß er möglicherweise gerade deshalb nicht der Abtragung zum Opfer gefallen ist. Im Gebiet von Sara lassen sich geradlinig verlaufende, durchkriechbare Röhren zum Teil durch zwei benachbarte Inselberge von einigen Zehnern von Meter Durchmesser hinweg verfolgen.

Die bisher größte Konzentration begeibar Höhlen wurde in den über 200 m hohen Inselbergen Ehi Ouarek und Ehi Wongan im Raum Orida gefunden. Eine über 40 m weit in den Berg hinein begehbare Galerie wurde bereits 1953 von RENAULT, von dem die bis jetzt einzige Arbeit über Sandsteinhöhlen in diesem Raum stammt, beschrieben. Es dürfte sich dabei um diejenige Höhle handeln, deren mehr als 30 m hohes Portal in Abb. 3 zu erkennen ist, deren innerer Teil wegen fehlender Strickleitern für uns jedoch leider nicht zugänglich war. Aber auch andere Höhlen konnten z.T. mehrere Zehner von Metern weit begangen werden, die weitere Ausdehnung in verschiedene Richtungen zumindest ausgeleuchtet werden. Deckenhöhen von mehreren Metern sind häufig. In einer zuerst 1981 entdeckten Höhle bei Orida liegt die sich spaltenförmig verengende Decke in mehr als 18 m Höhe.

Eine Höhle mit geringeren Abmessungen in Breite und Höhe zeigt Fig. 3 im Grund- und Aufriß (aus BUSCHE & ERBE 1987). Sie befindet sich in der Kaouarstufe bei der Oase Chemidour, nahe der Siedlung Dirkou, zusammen mit zahlreichen anderen Röhren und begehbaren Höhlenabschnitten, etwa auf halber Höhe des ca. 100 m hohen Stufenhanges. An ihr sind typische Merkmale der Sandsteinhöhlen zu erkennen, die in allen Fällen ihre Entsprechung im Kalksteinkarst haben.

Zu diesen Kennzeichen gehört die generelle Ausrichtung der Hohlräume, einschließlich derer von kurzen Röhren, die blind enden, an Kluftrichtungen. In vielen Fällen zeichnen sich die nicht durch die Lösung erweiterten Klüfte als feine Linien an der Decke

Fig. 3. Grund- und Aufriß einer Höhle an der Kaouar-Stufe nahe der Oase Chemidour (se Dirkou) (leicht verändert aus BUSCHE & ERBE, 1987).

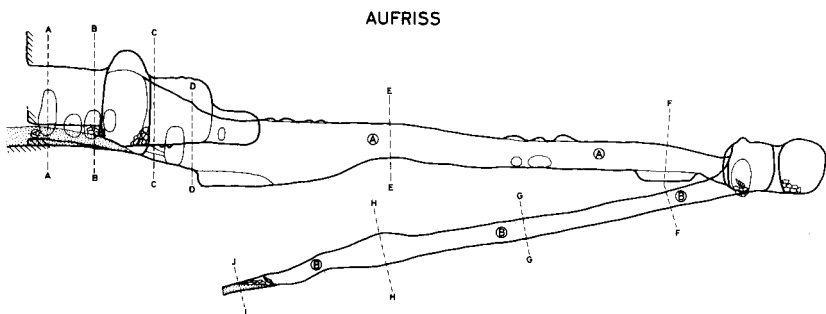
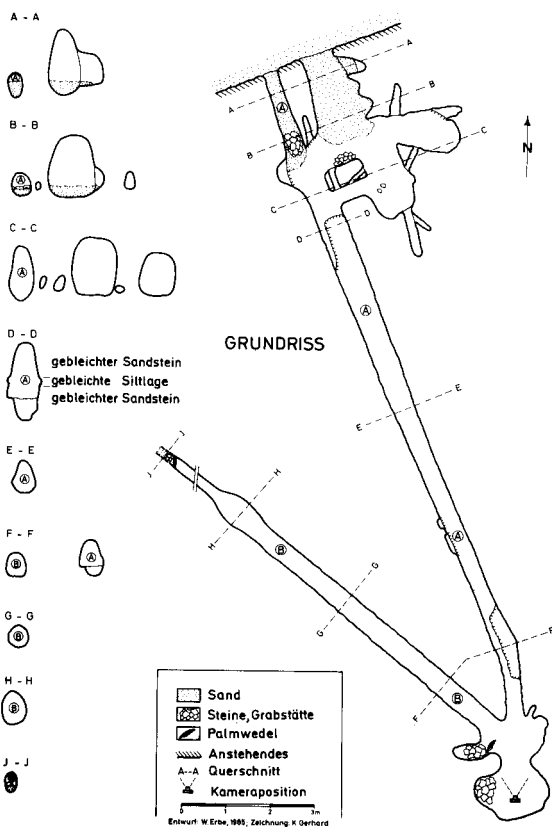


Fig. 3

oder am Ende von Hohlräumen ab. Bei den Röhren und Gängen dominieren ovale Profile mit senkrecht stehender längerer Achse sowie runde Formen. Wie im Aufriß angedeutet, sind die Decken häufig in Längsrichtung des Ganges kuppelförmig erhöht. Gegenläufige Gefälle am Boden von Gängen sind normal. Beim Zusammentreffen von zwei oder mehreren Gängen haben sich runde, z.T. fast perfekt kugelförmige oder ellipsoidförmige Kammern ausgebildet, die in andere solche Kammern übergehen können.

Tatsächlich hat fließendes Wasser in nicht mehr vollständig gefüllten Karstgefäßen andere Formen geschaffen. Sie fehlen in der hier dargestellten Höhle von Chemidour, weil diese, wie alle Höhlen, nur ein Fragment eines ausgedehnteren Systems ist, das bei der Ausbildung der Stufe, in anderen Fällen bei der der Inselberge, zerschnitten worden ist. In diesem Fall ist nur ein Höhlenabschnitt erhalten geblieben, der von der Stufenwand her ein Gefälle in den Berg hinein, mit seiner zweiten Röhre zwar ein Gefälle wieder gegen die Stufe, aber keinen Zufluß aus dem Berginnern hat. Dort, wo Wasser nach dem Zerschneiden des Systems noch zum Höhlenausgang fließen kann, finden sich vielfach kleine Gerinnebetten am Höhlenausgang, in den durchflossenen Gängen und Röhren aber ein bis zu mehrere Dezimeter eingeschnittenes Kastenprofil am Boden der Kreis- oder Ovalprofile. Dazu hat sich auch ein gleichsinniges Gefälle im Höhlenausgang eingestellt.

Ein Abschnitt dieses Kastenprofils ist im Vordergrund des Stereogramms Abb. 4 erkennbar. Darüber findet sich eine weitere, häufig auftretende Form: gestreckte, steile Seitenwände, die zusammen mit den jüngeren Erosionsrinnen ein trichterförmiges Profil bilden. V-förmige Profile dieser Art, mit oder ohne die kastenförmigen Rinne, sind auch aus Kalkstein-, insbesondere aber aus Gipskarsthöhlen bekannt, z.B. aus der Höhle des Bad Segeberger "Kalk"bergs.

Weiterhin zeigt das Stereogramm eine zwischen zwei Gängen stehengebliebene Säule, ebenfalls mit der steilen Rampe am Fuß. Bei der weiteren Untersuchung dieser Höhle im Inselberg Ehi Ouarek wurde rechts des Bildausschnitts parallel zu den zwei sichtbaren Gängen noch ein weiterer, nicht zugänglicher Gang festgestellt, ebenso wie ein tieferes, auch nicht zugängliches Stockwerk unter dem Boden beider kastenförmigen Rinnen.

In dieser Höhle führte kein Gang in die Höhe. In die Kuppel einer unmittelbar benachbarten großen Höhle mündet jedoch steil von oben eine Röhre von im Mündungsbereich mehr als 1 m Durchmesser. Auf dem Kammerboden unterhalb der Mündung fehlt aber jegliches Tosbecken - ein weiteres Indiz dafür, daß die Ausbildung dieser Formen in vollständig wassergefüllten Druckgefäßen abgelaufen ist. Für alle begangenen Höhlen gilt, daß das tatsächlich vorhandene dreidimensionale Geflecht von Röhren und Gängen größer als der erfaßte Teil ist. Augenfälligster Beleg dafür sind die Fledermäuse, die in nicht mehr zugängliche Passagen verschwanden.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Höhlen im Kalk- und im Sandstein besteht darin, daß in letzteren echte Tropfsteine fehlen. Zwar hat RENAULT (1953) geschrieben, daß es in den Höhlen Kieselsäurestalaktiten gäbe, die nur wenige Zentimeter lang seien. Diese in großer Zahl vorkommenden Stalaktiten bestehen jedoch aus auskristallisiertem Fledermausurin. Der Höhlenboden ist oft mehrere Zentimeter tief mit Fledermauskot bedeckt. Andere Höhlensedimente fehlen, abgesehen von eingewehtem Flugsand in den Eingangsbereichen.

Der Schattenfall auf dem Ehi Ouarek in Abb. 3 zeigt eine große Zahl von Röhren- und Höhlenausmündungen in nahezu allen Höhen des Inselberges an. Einige von ihnen konnten auf der Westflanke des Berges erreicht werden. Zwischen den Karströhren, die auf der Dachfläche des Djado-Plateaus in die Tiefe führen, und den untersten Höhlenausgängen am Fuß der Inselberge von Orida liegen fast 300 Höhenmeter. Die Inselberge mit den sie umgebenden Pedimentresten stehen am Boden von abflußlosen Stufenfußdepressionen, die über 40 m tiefer als die Vorlandfläche zwischen Djado- und Dissilakstufe, der westlichsten Stufe des Djado-Plateaus, liegt.

Die Inselbergflanken zeigen am deutlichsten, daß praktisch in allen Tiefen unterhalb der Dachfläche Karstgefäße ausgebildet worden sind. Eine der Höhlen am Inselbergfuß in Orida führt schräg in die Tiefe und zeigt an, daß die Verkarstung noch unter das Beckentiefste greift. Unter der Annahme, daß nicht schon eine über 300 m tiefgreifende Verkarstung unter der Ausgangsrumpffläche bestanden hat, sondern daß sie im Zusammenhang mit der flächenhaften Vorlandtieferlegung sukzessiv in die Tiefe vorgedrungen ist, ließe sich, ausgehend von der Reliefgeschichte der Region (BUSCHE 1988, im Druck) als Ende der Sandsteinverkarstung

etwa die Grenze Plio-Pleistozän annehmen.

Depressionen wie die der Dachfläche fehlen im gesamten Vorland, soweit es in Sandstein angelegt ist. Östlich des Plateau du Mangueni, wo das Stufenvorland in den oberkarbonen Dembabakalken angelegt ist, ist die Verkarstung des Kalksteins jedoch im Pleistozän noch weitergegangen, wie zahlreiche Einsturzdolinen zwischen Madama und Toummo zeigen (RENAULT 1953). Eine solche Doline im Enneri Achelouma ist erst mittelterrassenzeitlich, vor ca. 10.000 Jahren, eingebrochen und verfüllt worden (BUSCHE et al. 1979).

Massif de Termit und Massif de Koutous

Wie bereits in der allgemeinen Darstellung der geologisch-morphologischen Situation erwähnt, sind beide Gebiete aus kontinentalen Serien der Kreide und des Tertiär (Continental Intercalaire und Continental Terminal) aufgebaut. Die in beiden Gebieten auftretenden Lösungsformen können grob gegliedert werden in auf den Dachflächen entwickelte, mehr oder weniger senkrecht in den Untergrund eingreifende Depressionen und in eher horizontal bis schräg verlaufende Höhlen und Röhren, wie sie häufig an steilen Stufenabschnitten oder an Wadihängen angeschnitten sind. Generell kommen dabei den für das Djado und für das Kaouar beschriebenen ähnliche Formen vor, wobei aber im folgenden die lokalen Unterschiede aufgezeigt werden sollen.

Höhlen und Röhrenanschnitte sind im Massif de Termit an steilen Hangpartien in großer Häufung aufgeschlossen. Zwar erreichen sie nirgends die aus dem Djado bekannten sehr großen Dimensionen; auf 20 bis 30 m begehbare Passagen wurden jedoch mehrfach festgestellt.

Darüberhinaus weist das Massif de Termit das größte Vorkommen von "Mausloch-Horizonten" auf: Hierbei handelt es sich um meist sehr kompakte, mehrere Meter mächtige Sandsteinlagen, die von einer Vielzahl kleiner, kreisrunder Röhren mit 3 bis 10 cm Durchmesser durchsetzt sind. Soweit ertastbar, sind die Röhren teilweise miteinander verzweigt und können Längen bis über 2 m (Zollstockgrenze) erreichen. Am Röhrenaustritt sind häufig kleine Karren (Breite und Eintiefung 0,5-1,5 cm) entwickelt.

Die Höhlen und Röhren gleichen in ihrer Ausbildung denen im Djado und Kaouar. Auch die Kluftabhängigkeit ist sehr stark ausgeprägt. Im Normalfall sind die Hohlräume zumindest in Resten noch von Krusten ausgekleidet, die in den stark eisenhaltigen Sandsteinen meist als Eisenkrusten entwickelt sind, ansonsten aber auch als kieselige Krusten von 1-3 mm Stärke auftreten. Die Verfüllung der horizontal oder schräg verlaufenden Röhren beschränkt sich im allgemeinen auf einen dünnen Staubüberzug mit Korngrößenmaximum im Grobschluff-Feinsandbereich. Nach allen bislang vorliegenden Analysen handelt es sich hierbei um das gleiche Material, das auf den Dachflächen als allochtones Sediment rezent angeweht wird. In die Höhlenräume dürfte es durch weitere Verspülung gelangen. Außer diesem Staub findet man in den Höhlen manchmal eine mehrere Zentimeter dicke Lage von getrocknetem Fledermauskot.

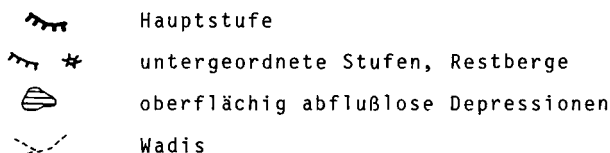
Vor allem der zentrale Teil des Massif de Termit östlich des Brunnens Dougoulé hat eine sehr stark von oberflächlich abfließenden Depressionen geprägte Dachfläche (Fig. 4). In diesem Bereich ist die Stufe sehr geschlossen ausgebildet. Die in den genannten Eisenkrusten des Continental Terminal entwickelte Dachfläche ist mit rund 3 km WE-Erstreckung relativ breit. Ein oberflächiges Entwässerungsnetz fehlt fast völlig; statt dessen wird das Gebiet unterirdisch entwässert. Die Depressionen, über die das Wasser abgeführt wird, sind mit Durchmessern von z.T. mehreren Zehnern von Metern und Eintiefungsbeträgen der Verfüllungsoberfläche von einigen Metern gegenüber der Umgebung (Abb. 5) deutlich größer als die vielerorts auftretenden kreisrunden Formen mit wenigen Metern Durchmesser (vgl. Abb. 1). Ihre Form ist im allgemeinen unregelmäßig zerlappt, was zusammen mit den stellenweise deutlichen Absätzen gegenüber ihrer Umrahmung und der mehrere Meter betragenden Eintiefung des Anstehenden zum Zentrum hin gegen eine Interpretation als Deflationswannen spricht. Bei Grabungen zur Beprobung des Feinmaterials wurde bei den größeren Depressionen die Basis der Verfüllung nicht erreicht. Innerhalb der Feinmaterialverfüllung können im wesentlichen zwei typische Phasen ausgliedert werden: Eine ältere, rötliche Verfüllung mit hohem Tongehalt (bis über 40 Gew.%) und eine jüngere von gelblich-grauer Farbe mit Korngrößenmaximum in der Grobschluff-Feinsand-Fraktion. Diese Abfolge mit jeweils sehr ähnlichen Analyseergebnissen konnte in sehr weiter Verbreitung im ganzen Arbeitsgebiet immer wieder festgestellt werden. Stellenweise sind diese Verfüllungen von einer jungen, geringmächtigen Sandauflage überdeckt. Neben

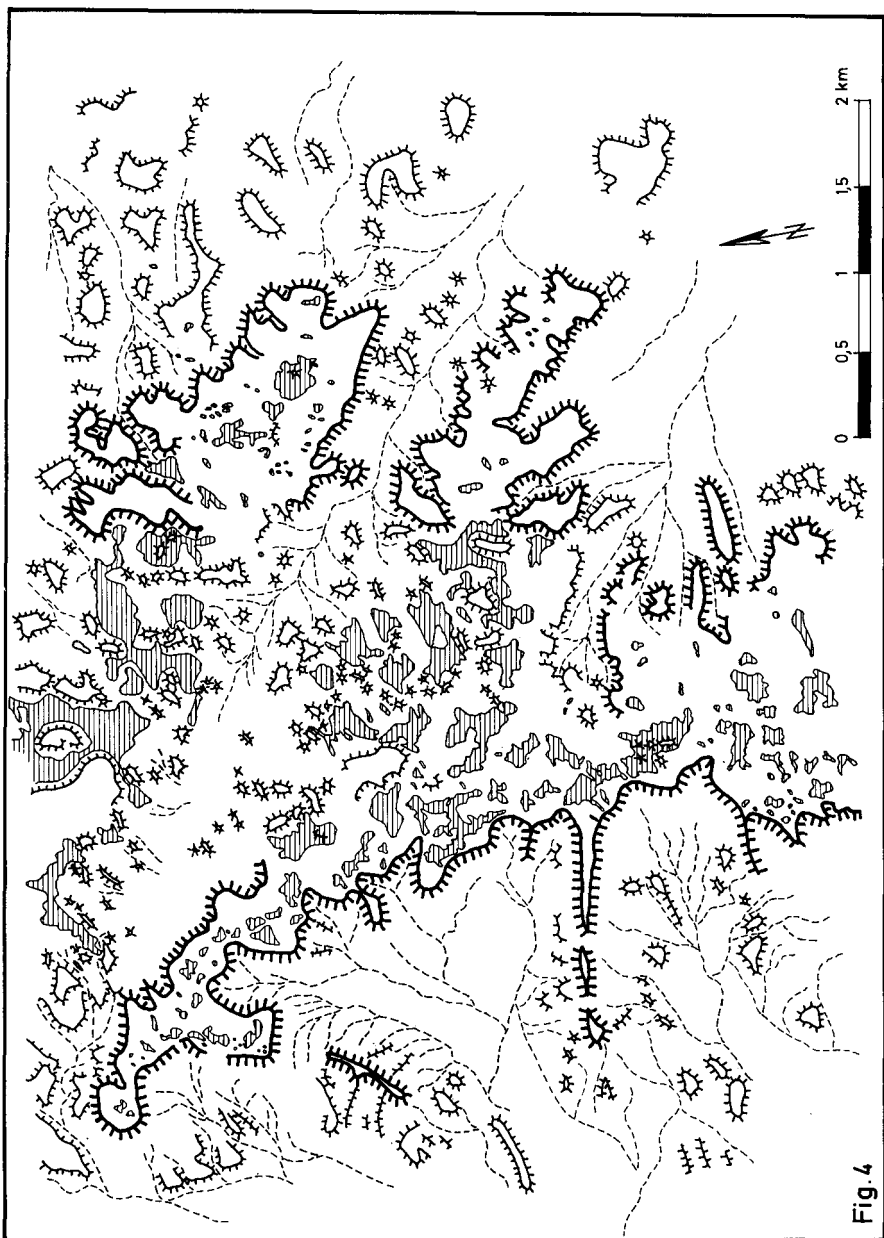
diesen verschiedenen Lockermaterialfüllungen kommen ausschließlich als Verfüllung senkrecht nach unten führender Röhren (s.u.) eisenverbackene Brekzien vor. Aufgrund ihrer großen morphologischen Widerständigkeit sind sie oft als Härtlinge um einige Dezimeter über ihre Umgebung herauspräpariert - ein weiterer Hinweis auf die alte Anlage der Lösungsformen.

Untereinander können die Depression durch Spuren oberflächiger, fluviatiler Erosion in der Feinmaterialverfüllung verbunden sein. Die Hauptentwässerung erfolgt jedoch unterirdisch, was anhand von Schlucklöchern belegt werden kann. In ihnen laufen die oberflächigen Gerinne zusammen. In einigen besonders großen Depressionen zeichnen regelrechte "Schluckrinnen" das Kluftnetz nach (Abb. 6). Mit Entfernungen von mehreren Kilometern zwischen Depressionen und Stufenrand können hier Piping oder ähnliche Prozesse als initiale Mechanismen des Stofftransportes ausgeschieden werden, zumal auch, wie bereits an anderer Stelle festgestellt, die Entwicklung der Karstformen noch in die Zeit vor der Stufeneintiefung zu stellen ist. Es hätte somit nirgends die Möglichkeit zur Abfuhr klastischen Materials bestanden, die "Gefäße" wären von Anfang an verstopft gewesen.

Im südlichen Teil des Massif de Termit wird die Stufe überwiegend aus Sandsteinen und sedimentären Eisenkrusten des Continental Terminal aufgebaut. In den die Dachfläche bildenden Eisenkrusten wurden dabei an mehreren Stellen senkrecht nach unten führende, kreisrunde Röhren mit bis zu einigen Dezimetern Durchmesser gefunden (Abb. 7). Sie sind mit Lockermaterialien in typischer Abfolge oder mit eisenverbackenen Brekzien verfüllt (s.o.).

Fig. 4. Die Verbreitung oberflächlich abflußloser Depressionen auf der Dachfläche des Massif de Termit östlich Dougoulé (nach Luftbildern ca. 1:50.000)





Wo sie freigegeben werden konnten, sind sie miteinander verbunden und stark verzweigt. Soweit sichtbar, setzen sie sich nach unten ohne Veränderung der Form oder der Dimension fort. Die einzelnen Röhren sind an der Oberfläche häufig nur noch durch schmale Rippen voneinander getrennt. Sie geben damit dem Gestein insgesamt einen schwammartigen Charakter. Die größte gemessene Dichte dieser Röhren liegt bei $46/4\text{m}^2$.

Im Koutous treten generell die gleichen Formen auf wie im Massif de Termit, wobei auch die jeweiligen Dimensionen vergleichbar sind. Zwei weitere typische Karstformen wurden darüberhinaus bislang nur hier beobachtet (beide im Norden des Koutous):

In einem hufeisenförmigen Talschluß sind an den Steilwänden mehrfach senkrechte, runde Schlote mit einigen Metern Durchmesser angeschnitten. Sie reichen bis in/unter(?) das Niveau der den Hangfuß überziehenden Schutthalde. In einem dieser Schlote ist ein Rest von Verfüllungsmaterial erhalten. Es handelt sich dabei um eine stark tonhaltige, rötliche Matrix, in die einzelne Sandsteinbröckchen eingebettet sind. Die Analyseergebnisse zeigen große Ähnlichkeit mit dem oben beschriebenen Verfüllungstyp der älteren Phase.

Ebenfalls senkrecht von den Dachflächen nach unten führende Formen wurden auch im äußersten Norden des Koutous gefunden: Offensichtlich an der heutigen, im Sandstein entwickelten Oberfläche gekappte Lösungsformen reichen mindestens 8 bis 10 Meter unter die Plateauoberfläche. Teilweise weitet sich die Hohlform nach einer kreisrunden Öffnung kammerartig aus und führt in mehreren Verzweigungen weiter schräg nach unten (im Rahmen der Geländearbeiten nicht begehbar, deshalb keine genauen Maßangaben). In anderen Fällen findet sich eine derartige runde Engstelle erst etwa 2 m unter der Geländeoberfläche, bei sonst gleichartiger Gesamtform (Abb. 8). Erkennbar waren diese Formen deshalb so gut, weil sie teilweise von der ansässigen Bevölkerung aufgedeckt waren (Zisternenbrunnen oder Gewinnung der Füllmaterialien). In Taschen sind jedoch Reste der ehemaligen Verfüllung noch erhalten und belegen die bereits aus dem Massif de Termit bekannte Mehrphasigkeit. Außerdem zeigen diese Verfüllungsreste klar die natürliche Anlage der Formen. Bergbau im Anstehenden konnte nirgends festgestellt werden.

Argumente für Lösung nach den bisherigen Feldebefunden

- Bis ins Detail reichende **Formenkonvergenz** zum Karbonatkarst:
Wären die bis jetzt beschriebenen abflußlosen Depressionen in Kalkstein ausgebildet, würden sie ohne Einschränkung als Lösungsdolinen, Uvalas oder Poljes bezeichnet werden. Sowohl der Messak- bzw. Nubische Sandstein als auch der kambrische Sandstein, in dem diese Formen gefunden worden sind, sind vollständig kalkfrei. Dies gilt selbstverständlich auch für die Silcrete- und Eisenkrusten, in und durch die hindurch diese Formen eingesenkt worden sind.

Dennoch sprechen sowohl die steilen Ränder der Depressionen, bei sedimentfreien Formen der ebene Boden mit scharfem Hangknick, die Ausbildung bzw. das Fehlen des oberirdischen Entwässerungsnetzes und schließlich vor allem die nachgewiesene unterirdische Entwässerung dafür, diese Formen als Karstformen anzusprechen.

Mögliche alternative Entstehungsmodelle lassen sich leicht zurückweisen:

- Deflationswannen, wie sie örtlich im Stufenvorland vorkommen, unterscheiden sich durch einen in etwa ovalen Grundriß, dessen Hauptachse mit der Passatwindrichtung übereinstimmt. Dies ist bei den angesprochenen Hohlformen, von denen die größeren auch recht unregelmäßige Grundrisse haben können, kaum einmal der Fall. Dagegen findet sich an Depressionsrändern nahe der Trauf häufig ein gut ausgebildeter fossiler Windschliff, und in dem Gebiet der Fig. 2 sind die Ränder größerer Depressionen sogar in Windhöcker aufgelöst worden. Bereits vorhandene Hohlformen sind also lediglich örtlich durch Windschliff umgestaltet, aber nicht durch ihn geschaffen worden.
- Gegen eine gesteinsbedingte Bildung spricht, daß Umgebung, Wände und Boden sedimentfreier Depressionen sich nicht signifikant petrographisch voneinander unterscheiden. Außerdem ließe sich die subterrane Entwässerung so nicht erklären.
- Ausbildung eines **dreidimensionalen Höhlen- und Röhrensystems**, häufig auch mit **rückläufigem Gefälle**, das sogar unter das Niveau des heutigen Stufenvorlandes hinabreichen kann:
Das wichtigste Argument dafür, die beschriebenen Formen als Karst anzusprechen, liefert das zugehörige unterirdische System

von Röhren und Höhlen. Der Zusammenhang zwischen den ober- und den unterirdischen Formen ergibt sich eindeutig aus den Schlucklöchern, deren offene Passagen in einigen Fällen einsehbar sind. An Stufenrändern wurden mehrfach Längs- und Schräganschnitte von senkrechten Röhren gefunden, an der Dissilakstufe im südwestlichen Djado sogar in Verbindung mit horizontalen Lösungsrinnen auf dem Plateau und einer kolkreichen Übergangsstrecke. Die Entwicklung dieser Formen ist nur möglich gewesen, wenn die Hohlräume, wie auch beim Karbonatkarst, zur Zeit ihrer Ausbildung vollständig mit Wasser gefüllt gewesen sind, das zur Abfuhr gesättigter Lösungen langsam zirkuliert haben muß. Insbesondere gilt dies für die Deckenkuppeln und die zahlreichen blind endenden Seitengänge und -röhren, auch wenn man sich die mechanische Auswaschung durch schnell strömendes Wasser in einer tektonisch geweiteten Kluft noch vorstellen kann.

- Die Formen sind **durch Piping nicht erklärbar:**

Bei Diskussionen über den Sandstein- und Eisenkrustenkarst ist mehrfach der Einwand gebracht worden, daß die angeblichen Karstgefäße auch Ergebnisse des Piping, also der mechanischen Auswaschung von aus dem Verband gelösten Sandkörnern sein könnten. Dagegen sprechen jedoch die oben beschriebenen Formenelemente der Höhlen, die alle ihre Entsprechung im Kalksteinkarst haben, sowie in zahlreichen Fällen auch die Größe der Hohlräume. Außerdem müßte bei der ausspülenden Erweiterung von Klüften Sand in Abschnitten mit rückläufigem Gefälle und anderen Sedi-
mentfallen liegengeblieben und zur Verstopfung von Röhren geführt haben. In keiner Höhle wurden jedoch derartige Sedimente angetroffen. Gefunden wurden zusedimentierte Röhren ausschließlich auf den Dachfläche und an Hängen. In den nordöstlichen Arbeitsgebieten (Mangueni, Djado) besteht die Verfüllung in allen Fällen aus mittelterrassenzeitlichem Feinmaterial und Hangschutt, hat also nichts mit der Ausbildung der Gefäße selbst zu tun. Das gleiche dürfte auch für die älteren, rötlichen Röhrenverfüllungen im Termit gelten (s.o.).

- **Gleiche Dimension und Ausprägung** aller genannten Karstformen in den Hauptstufen und in vorgelagerten Restbergen.

Insbesondere die horizontalen Elemente müssen als gekappte Reste eines ehemals zusammenhängenden Systems angesprochen werden. Damit ist ihre Entstehung vor die Eintiefung der Stufenvorländer zu stellen.

- Die in Resten noch vorhandenen **Krusten** können nach den bisherigen Untersuchungen als Ausfällungen aus langsam zirkulierenden Lösungen angesehen werden.

Das heißt, daß auch diese Phase der Krustenbildung noch im Grundwasserbereich abgelaufen ist. Die Hohlräume müssen deshalb nach ihrer Entstehung noch längere Zeit unter geänderten Lösungs- bzw. Ausfällungsbedingungen wassererfüllt gewesen sein.

Einordnung der Lösungsformen in den landschaftsgeschichtlichen Zusammenhang

Ungefähr läßt sich abschätzen, seit wann diese Lösungsformen gebildet worden sein können. Sie sind in die Silcretedecke, auf den Plateauresten südlich des Kaouar in die Eisenkrustendecke des Continental Terminal eingesenkt worden. Die siderolithische Fazies des Continental Terminal wurde nach FAURE (1966) im ausgehenden Oligozän in Südniger aus den Abtragungsprodukten der nördlichen Schwellenregion aufgebaut. Die Silcretedecke wurde dort nach der Abräumung der Latosoldecke gebildet. Die paläogeographische Situation war die einer Ost-West-Schwellenregion, die im Norden in die noch weit nach Süden ausgreifende Syrtebucht, im Süden in eine Lagunenlandschaft überging (FAURE 1966, KLITZSCH 1970, BUSCHE 1983).

Die Zerschneidung des Untersuchungsgebietes, und damit das Ende der Silcretebildung, die nur in dem küstennahen, schlecht drainierten Gebiet möglich gewesen war, hat im Zusammenhang mit der Aufwölbung von Hoggar und Tibesti im Laufe des Miozän eingesetzt (BUSCHE 1983). Die Entwicklung der abflußlosen Depressionen dürfte demnach nicht vor dem frühen Miozän eingesetzt haben, aber noch vor der Zeit der Plateauzerschneidung, denn die Depressionen finden sich nur auf den Dachflächenniveaus, nicht jedoch auf tieferen Zwischenniveaus der flächenhaften Vorlandabtragung oder auf dem Niveau der Vorland- bzw. Ténéréfläche.

Ein Grund dafür, daß die Karstgefäße in diesem Arbeitsgebiet so gut ausgebildet sind, ist möglicherweise in der intensiven Tiefenverwitterung im Eozän, vor der Abspülung der Latosoldecke und deren Ablagerung als Continental Terminal im Süden zu sehen. Sie hat zu einer Weißbleichung bei weitestgehender Abfuhr der Nicht-

quarzbestandteile des Sandsteins geführt. FAURE (1966) stellt für das Kaouar fest, daß nirgends mehr die ursprünglichen Gesteinsfarben existieren. Durch das Weiß ziehen sich schichtunabhängige Schlieren von hellem Rosa oder blasserem Lila. Die braune Sandsteinfarbe der Felsoberflächen wird durch eine dünne Patina bewirkt.

Somit können bei günstigen Bedingungen für Quarzlösung kaum andere, die Gefäße verstopfende Rückstände übriggeblieben sein. Dies gilt in gleicher Weise für das Silcrete, das ebenfalls fast frei von anderen Bestandteilen außer Quarz ist. Die Eisenkrusten, in denen besonders auf den südlichen Plateaus die Dachflächendepressionen angelegt sind, konnten als chemische Sedimente offensichtlich ebenfalls vollständig wieder in Lösung zurückgeführt werden.

Darüber, durch welche chemischen oder biochemischen Prozesse und unter welchem Klima diese intensive Lösung von Sandstein, Silcrete und Eisenkrusten möglich gewesen ist, fehlen noch die Untersuchungen. Sicher ist nur, daß die Karstformen nicht unter ariden Bedingungen gebildet worden sind. Die übrige Reliefgeschichte des Raumes seit dem Beginn des Miozän (BUSCHE 1980, 1988, im Druck) spricht für ein überwiegend warm-feuchtes Klima, das vor der Zerschneidung der Ausgangsrumpffläche auf eine Küstenebene einwirkte.

Literatur

- ANELLI, F. (1963): Fenomeni Carsici, Paracarsici e Pseudokarsici.
- In: Giorn. Geol. 2/31, 1963: 11-25.
- BUSCHE, D. (1980): On the origin of the Msak Mallat and Hamadat Manghini escarpment. - In: SALEM, M.J. & M.T. BUSREWIL (ed.): Geology of Libya, 3:837-848.
- (1983): Silcrete in der zentralen Sahara (Murzuk-Becken, Djado-Plateau und Kaouar; Süd-Libyen und Nord-Niger). - In: Z. Geomorph. N.F., Suppl. 48: 35-49.
- (1988): Die geomorphologische Entwicklung des westlichen Murzuk-Beckens, des Djado-Plateaus und des nördlichen Kaouar. - Würzburger Geogr. Arb., im Druck.
- BUSCHE, D. & W. ERBE (1987): Silicate karst landforms of the southern Sahara (north-eastern Niger and southern Libya). - In: Z. Geomorph. N.F., Suppl. 64: 55-72.
- BUSCHE, D., J. GRUNERT, E. SCHULZ & A. SKOWRONEK (1979): Erste Radiokarbondaten aus dem Vorland des Messak Mellet und Plateau du Mangueni, Zentral-Sahara. - In: Würzburger Geogr. Arb. 49: 183-198.
- BUSCHE, D. & H. HAGEDORN (1980): Landform development in warm deserts - the central-Saharan example. - In: Z. Geomorph. N.F., Suppl. 36: 123-139.
- FAURE, H. (1966): Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger oriental. - Mémoires du B.R.G.M. 47: 630 p.
- GAUDA, M., H. KLOSE, E. KNUST et al. (1982): Röhrenstrukturen und röhrenförmige Höhlen im pfälzischen Buntsandstein. - Abh. zur Karst-u. Höhlenkunde, Reihe A, 20: 101 p.
- GAVRILOVIC, D. (1969): Die Höhlen im Tibesti-Gebirge (Zentrale Sahara). - V. Internat. Kongr. Speläologie, Stuttgart 1969, Abh. 2.
- GEZE, B. (1951): Cavités souterraines et dolines dans les roches non karstiques. - In: Annales de Spéléologie, 6 (2-3): 61-66.
- GRUNERT, J. (1983): Geomorphologie der Schichtstufen am Westrand des Murzuk-Beckens (Zentrale Sahara). - Relief - Boden - Paläoklima 2, 271 p.
- GRUNERT, J. & D. BUSCHE (1980): Large-scale fossil landslides at the Msak Mallat and Hamadat Manghini escarpment. - In: SALEM, M.J. & M.T. BUSREWIL (ed.): Geology of Libya 3: 849-860.
- JÄKEL, D. (1982): Zur Entstehung von Grarets im Fezzan und karstähnlichen Hohlformen in Basalten des Jabal es Sawda,

- Libyen, und Tibesti, Tchad. - In: Würzburger Geogr. Arb. 56 (Festschrift JÜRGEN HÖVERMANN): 111-123.
- KLITZSCH, E. (1970): Die Strukturgeschichte der Zentralsahara. - Geol. Rdsch. 59: 459-527.
- MAINGUET, M. (1972): Le modelé des grès. - 2 Bde., Institut Géographique National, Paris.
- PLAUCHUT, B., H. FAURE, J. JAQUEMONT et al. (1960): Notice explicative sur les feuilles Djado et Toummo 1:500.000. - Bureau de Recherche de Pétrole, B.R.G.M. Dakar: 38 p.
- RENAULT, P. (1953): Caractères généraux des grottes gréseuses du Sahara méridional. - Premier Congr. Intern. de Spéléologie, Paris, 2: 275-289.
- SUMMERFIELD, M.A. (1983): Silcrete. - In: GOUDIE, A.S. & K. PYE (ed.): Chemical sediments and geomorphology: precipitates and residua in the near-surface environment: 59-91.
- TIETZ, G.F. (1987): Lösung und Ausheilung tropisch verwitterter Quarze aus einem Oberkreide-Sandstein (SW-Nigeria). - In: Facies, 17: 267-276.
- WHITE, W.B., G.L. JEFFERSON & J.F. HAMANN (1966): Quarzite karst in south-eastern Venezuela. - In: Internat. Journal of Speleology, 2 (1966): 309-314.

*Detlef Busche und Barbara Sponholz
Geographisches Institut
Universität Würzburg
Am Hubland
D-8700 Würzburg*

Abbildungen



Abb. 1. Feinmaterialverfüllte Lösungswannen auf dem Plateau du Mangueni südöstlich Blaka Laodemi. Die Lösungswannen sind in ein bis zwei Meter mächtigem Silcrete über Nubischem Sandstein entwickelt. (Aufnahme März 1981, Blick nach E)

Abb. 2. Geschlossene Depression mit ebenem Boden am Südwestrand des Plateau du Djado. Darin sind drei mit hellem Feinmaterial verfüllte Schlucklöcher zu erkennen (Durchmesser jeweils 0,5-1 m). (Aufnahme März 1981, Blick nach WNW)

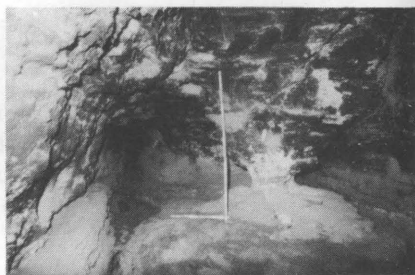
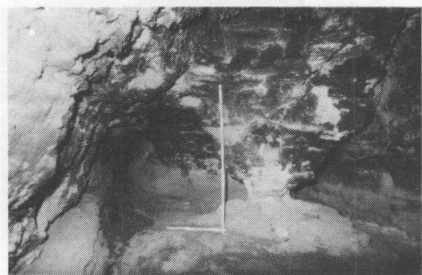
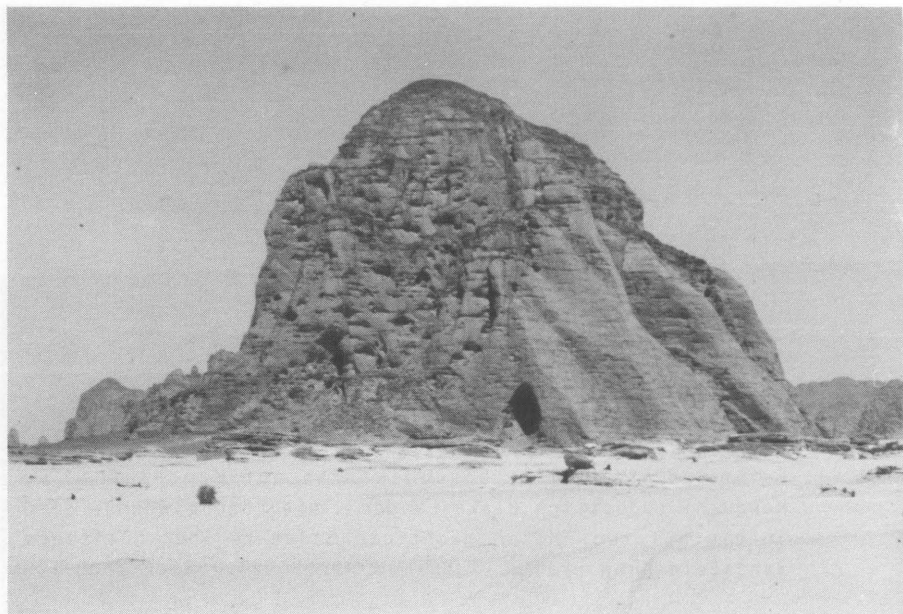


Abb. 3. Inselberg Ehi Ouarek nahe Orida/südwestliches Djado-Vorland. Durch den Schattenfall gut zu erkennen sind die zahlreichen Höhlen- und Röhrenaustritte mit jeweils mehreren Metern Durchmesser. Am Fuß des Inselbergs das über 30 m hohe Eingangsportal einer der größten gefundenen Höhlen. (Aufnahme vom Oktober 1986, Blick von SW)

Abb. 4. Innenraum einer kleineren Höhle im Ehi Ouarek. In der Bildmitte eine stehengebliebene Säule mit rundum gleichmäßig abgeschrägtem Fuß (keine Wiederausfällungsform!). Links kastenförmige, durch mechanische Erosion nachträglich geschaffene Rinne. (Stereoaufnahme vom Oktober 1986)



Abb. 5. Dachfläche des Massif de Termit östlich des Brunnens Dougoulé. Die Dachfläche ist geprägt von feinmaterialverfüllten Depressionen mit Durchmessern von meist einigen Zehnern von Metern. (Aufnahme vom März 1986, Blick nach NE)

Abb. 6. Am Kluftnetz orientierte "Schluckrinne" in einer dieser Depressionen. Wegen des auf die Rinnen hin gerichteten Oberflächenabflusses innerhalb der Depression wird ihr Verlauf stark durch Gras- und Buschvegetation nachgezeichnet. (Aufnahme vom März 1981)

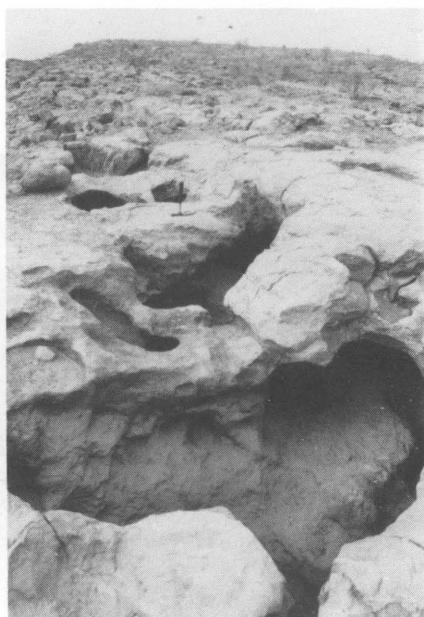


Abb. 7. Lösungsröhren in sedimentären Eisenkrusten des Continental Terminal im südlichen Massif de Termit. In großer Zahl greifen die Röhren mit Durchmessern im Dezimeter-Bereich senkrecht bis schräg in die Dachfläche ein. Sie sind mit verschiedenen Feinmaterialien oder eisenverbackenen Brekzien verfüllt. (Aufnahme vom März 1986)

Abb. 8. Lösungsform auf der Sandstein-Dachfläche im Osten des Massif de Koutous. Kleinere Lösungsröhren laufen im Anstehenden oberflächennah zusammen und setzen sich unter Ausweitung fast senkrecht nach unten fort. Teilweise sind die Formen von der ansässigen Bevölkerung freigegraben, Reste der ehemaligen Verfüllungen sind aber noch erhalten. (Stereoaufnahme vom April 1986, Blick nach N)